

論文 自己収縮存在下におけるセメント系材料のクリープ特性に関する研究

浜中 隆*¹・佐々木美江*²・大下英吉*³

要旨: 本研究は、自己収縮モデルを導入した既存の解析手法¹⁾の加圧環境下への適用性範囲の拡張、さらに若材齢時におけるクリープ予測式の提案を目的とした。解析手法の適用性評価は、雰囲気気圧および載荷材齢をパラメータとした自己収縮測定値との比較により実施した。その結果、雰囲気気圧の増加に伴い自己収縮も増加し載荷材齢が小さい程雰囲気気圧による影響が大きいこと、さらに、既存の解析手法の加圧環境下への適用性が確認された。

キーワード: 自己収縮, クリープ変形, 雰囲気気圧, 水和反応

1. はじめに

近年、高性能減水剤やシリカヒュームなどの使用により、極めて水セメント比の小さいコンクリートの製造が可能となった。しかしながら、このようなコンクリートは自己収縮の影響が懸念されており、現在多くの研究実績が報告されている。

既往の研究^{1),2)}によると、自己収縮メカニズムは、水和反応により発生するセメント・コンクリート内部の不安定応力状態を駆動力とするクリープ変形であると報告されている。すなわち、自己収縮とは水和反応による一種のクリープ変形である。このようなメカニズムに基づいて著者ら²⁾は、上述のようなクリープ変形として捉えた自己収縮解析手法を構築し、1.0 気圧下および減圧環境下における自己収縮測定実験との対比により構築した解析手法の適用性評価を行っている。その結果、早強および普通セメントにおいてその適用性が確認され、クリープ変形として捉えた自己収縮発生メカニズムの妥当性が確認された。減圧環境下における早強セメントの挙動は、雰囲気気圧を減少するにつれて自己収縮も大きく減少しており、このことは、雰囲気気圧を減少することにより不安定応力状態の程度が小さくなり、自己収縮が減少したものと確認された。一方、普通セメントでは、雰囲気

気圧を減少することによる自己収縮への影響は確認されなかった。それでは、加圧環境下での自己収縮はどのような挙動を示すのであろうか。このことは、セメント・コンクリートの自重あるいはリフト打ちされたコンクリートの自重が自己収縮に及ぼす影響評価として言い換えることができるであろう。そして、自己収縮をクリープ変形として捉えることが可能であることから、自己収縮と外力によるクリープ変形を個々に捉えるのではなく、1つのクリープ変形として評価することが望まれる。

そこで本研究では、上述のような観点から早強セメントのみを対象とし、既存の解析手法の加圧環境下への適用範囲の拡張、さらには自己収縮存在下におけるクリープ予測式を提案した。解析手法の適用性範囲の拡張は、雰囲気気圧および載荷材齢をパラメータとした自己収縮測定値との比較により行った。また、通常クリープ変形は一軸載荷状態での検討が多いことから、既存の解析手法を用いその状態下での挙動を把握した上で、外力によるクリープ変形と自己収縮の両者を同時に評価可能な自己収縮存在下におけるクリープ予測式を提案する。予測式の提案にあたっては田澤ら³⁾の研究により、セメントの鉱物組成である C_3A が自己収縮に対し大きな影響を及ぼすと考えられていることから、自

*¹中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*²中央大学学生 理工学部土木工学科 (正会員)

*³中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

己収縮の駆動力である不安定応力状態の程度(以下、不安定度)を C_3A の水和反応に起因するものと仮定し、 C_3A の水和反応過程という観点から実施した。

表-1 材料パラメータ

使用セメント	早強ポルトランドセメント
W/C	0.30
密度 (g/cm ³)	3.13
凝結始発時間(分)	179
供試体寸法	4cm×4cm×16cm

表-2 実験パラメータ

載荷材齢	測定雰囲気圧
3時間	1.0気圧, 2.0気圧, 3.0気圧
	1.0気圧→2.0気圧 1.0気圧→3.0気圧
8時間	1.0気圧→2.0気圧 1.0気圧→3.0気圧
	1.0気圧→2.0気圧 1.0気圧→3.0気圧

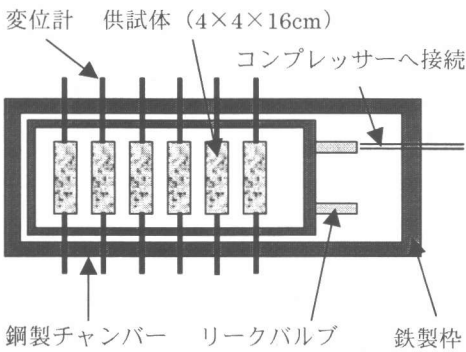


図-1 実験装置上面図

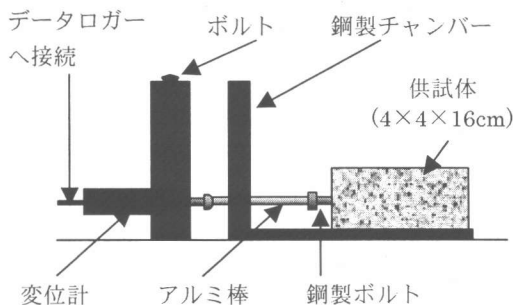


図-2 実験装置側面図

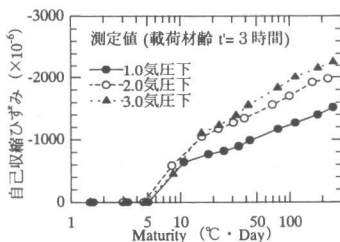


図-3 測定値(載荷材齢 $t'=3h$)

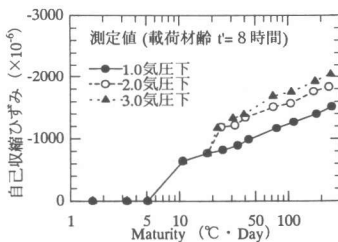


図-4 測定値(載荷材齢 $t'=8h$)

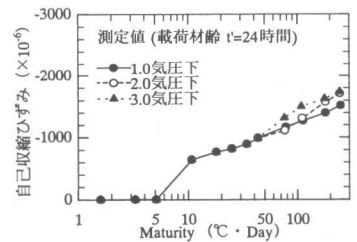


図-5 測定値(載荷材齢 $t'=24h$)

2. 自己収縮に及ぼす雰囲気圧の影響評価

2.1 使用材料および配合

自己収縮測定実験には、W/C=30%、 $4 \times 4 \times 16$ (cm)の形状寸法をしたセメントペースト供試体を用いた。使用セメントは既往の研究²⁾により、雰囲気圧の影響が大きい早強セメントとし、混和材は無添加とした。使用したセメントの材料パラメータを表-1に示す。

2.2 実験方法およびパラメータ

測定は $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $40 \pm 5\% \text{R.H.}$ の環境下で表-2に示す7パターンにおいて行った。なお、測定は、材齢5,8,12,18,24時間,2,3,5,7日で行った。

供試体は、型枠による拘束を防ぐためにセメントペーストを発泡スチロール製の型枠に打ち込んだ。仕上げ面は打ち込み後直ちに水分の逸散を防ぐためにアルミ箔テープでシールし、図-1示す恒温室内のチャンパーに静置した。実測ひずみの測定は図-2に示すようにあらかじめ供試体にセットした鋼製ボルトに変位形(1/1000mm)を当てて行った。なお、自己収縮は、供試体に埋設した熱電対で計測された温度による補正を行い算出した。

2.3 加圧環境下における

自己収縮測定結果

各載荷材齢での自己収縮に及ぼす雰囲気圧の影響を図-3~5に示す。なお、時間軸には水和発熱の影響を考慮するため積算温度を用いた。

図-3に示す載荷材齢が3時間では、1.0、2.0および3.0気圧下での自己収縮を比較すると、載荷材齢から時間が経過するにつれて差異が生じており、測定完了時では1.0気圧下の自己収

縮に比べ、2.0 気圧下では約 500 μ 大きな値となり、3.0 気圧下では約 800 μ 大きな値となっている。一方、図-5 に示す載荷材齢 24 時間では、測定完了時において各雰囲気気圧下での自己収縮にあまり差異が生じていない。

これらの結果から、各載荷材齢の測定値は外力によるクリープ変形と作用応力の間に、比例関係が成立しないことが確認できる。さらに、各載荷材齢での自己収縮に及ぼす雰囲気気圧の影響は、載荷材齢が若い程その影響が非常に大きくなることを確認できる。このことは、材齢が若い程水和反応により発生するセメント・コンクリート内部の不安定度が大きく、また、骨格の強度が弱いため雰囲気気圧の影響を大きく受けていることが考えられる。

3. クリープ変形として捉えた

自己収縮モデルの適用性評価

本章では、既存の解析手法¹⁾の加圧環境下への適用性範囲の拡張をするにあたり、前章に示す測定値との比較を行った。

3.1 解析理論¹⁾

自己収縮モデルを導入した 2 相多孔質材料の支配方程式を式(2)に示す。

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & -[H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L^T] & -[S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{u\}}{dt} \\ \frac{d\{p\}}{dt} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\{f\}}{dt} + A \frac{d\{T\}}{dt} \\ W \frac{d\{T\}}{dt} - \frac{d\{f_p^{cr}\}}{dt} + \frac{d\{f_p^{hyd}\}}{dt} - \{f_p^{cur}\} \end{array} \right\}$$

上式において、節点変位ベクトル $\{u\}$ と節点間隙水圧 $\{p\}$ を未知数として境界条件を代入することにより、水和反応過程における内部空隙(水隙)の負圧の程度と骨格の圧縮力が求まり、これを不安定初期応力としたクリープ変形が自己収縮として自動的に求まることになるわけである。なお、式(2)における、マトリックスおよびベクトルの詳細は文献 1) に記す。

3.2 解析モデル

解析モデルは図-6 に示すように 4×4×

16(cm)のセメントペースト供試体の 1/8 モデルであり、境界条件は変位に関しては一軸状態であり、間隙水に関しては全面非排水である。また、解析パラメータおよび解析に用いた各材齢におけるヤング係数は表-3,4 に示す通りである。なお、表-4 に示したヤング係数は 1.0 気圧下の測定値であり、各種雰囲気気圧に関してはその条件下での測定が困難なため、1.0 気圧下における値に温度補正を行って導出した。

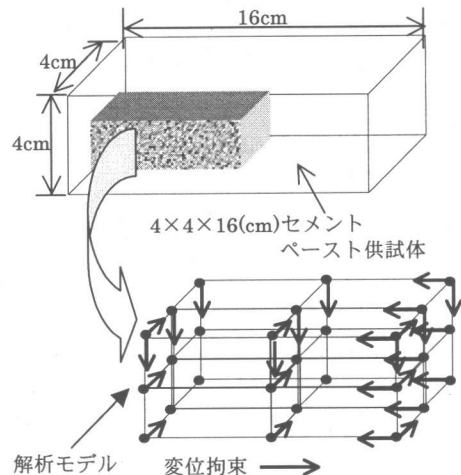


図-6 解析モデル

表-3 解析パラメータ

水の体積弾性係数 (kN/mm ²)	2.2
透水係数 (cm/s)	1.05×10 ⁻⁷

表-4 ヤング係数

材齢 (Day)	ヤング係数 (kN/mm ²)
0.21	5.5
0.33	10.1
0.50	13.7
0.75	16.9
1.00	18.4
2.00	19.9
3.00	20.8
5.00	21.7

3.3 加圧環境下における

既存の解析手法の適用性評価

既存の解析手法の加圧環境下への適用性評価の結果を図-7~11 に示す。図-7~9、図-10,11 および図-12,13 はそれぞれ載荷材齢 3 時間、8 時間および 24 時間の結果である。

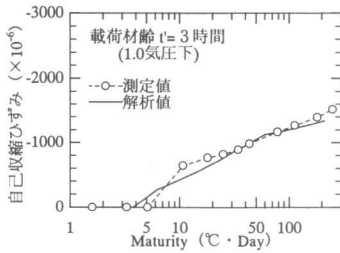


図-7 $t'=3h(1.0 \text{ 気圧下})$

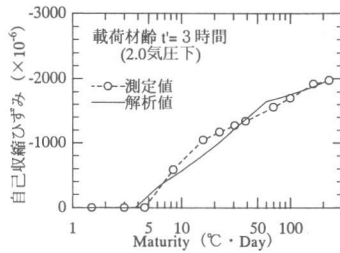


図-8 $t'=3h(2.0 \text{ 気圧下})$

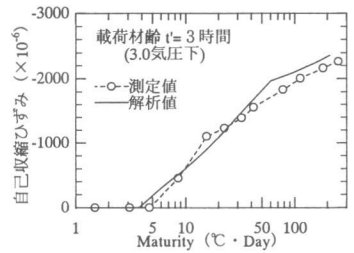


図-9 $t'=3h(3.0 \text{ 気圧下})$

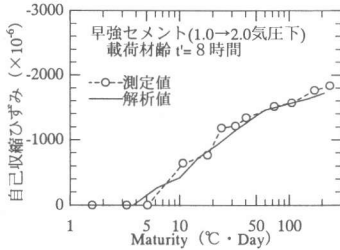


図-10 $t'=8h(1.0 \rightarrow 2.0 \text{ 気圧下})$

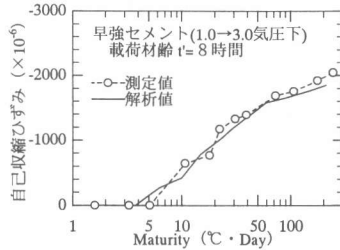


図-11 $t'=8h(1.0 \rightarrow 3.0 \text{ 気圧下})$

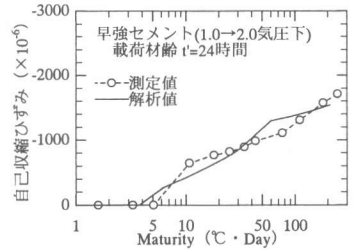


図-12 $t'=24h(1.0 \rightarrow 2.0 \text{ 気圧下})$

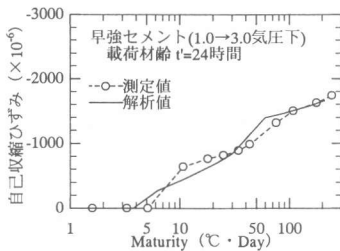


図-13 $t'=24h(1.0 \rightarrow 3.0 \text{ 気圧下})$

図-7~9に示す載荷材齢3時間の結果は解析完了時において、1.0気圧下、2.0気圧下および3.0気圧下ではそれぞれ1400 μ 、2000 μ および2400 μ となっており、挙動ならびに値ともに測定値を精度良く評価していることが確認できる。また、図-10,11および図-12,13においても測定値を精度良く評価しており、既存の解析手法の加圧環境下への適用性が確認できる。

3.4 一軸載荷状態における

クリープ変形の解析的検討

クリープ変形は通常一軸載荷状態での検討が多いことから、各雰囲気気圧が一方方向にのみ作用した場合の変形挙動を図-14~16に示す。これらの結果から、一軸載荷状態では図-3~5に示す等方圧状態での測定値より大きな値を示している。また、図-3~5に示す等方圧状態での結果と同様に比例関係が成立しないことが確認できる。そして、この関係は載荷材齢が3時間および8時間という極初期材齢において顕著であり、ある程度硬化が進み自己収縮の発生が緩やかになる載荷材齢24時間では、比較的関係が成立することが伺える。

そこで、次章ではこれらの挙動に対し、外力によるクリープ変形と自己収縮を同時に評価可

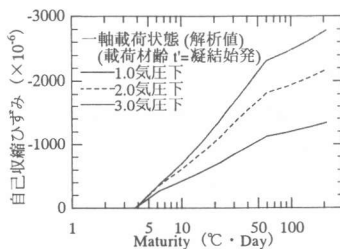


図-14 一軸載荷状態 $t'=3h$

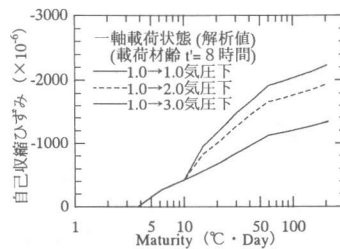


図-15 一軸載荷状態 $t'=8h$

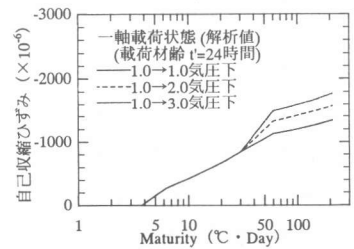


図-16 一軸載荷状態 $t'=24h$

能な自己収縮存在下におけるクリープ予測式を提案する。

4. 自己収縮存在下における

クリープ予測式の提案

これまでに述べたように、自己収縮が大きく発生している若材齢時においては、外力によるクリープ変形の重ね合わせ則が成立しないこと、さらに、自己収縮は水和反応による一種のクリープ変形であることから、これらのクリープ変形を個々に捉えるのではなく、両者を同時に評価する必要があると考えられる。そこで本研究では、クリープ変形を式(3)のような $t, t', t-t'$ および σ をパラメータとして含む関数で評価することにより、自己収縮存在下におけるクリープ予測式を提案する。

$$\varepsilon_{cr} = \frac{f(\sigma) \cdot \phi(t, t', t-t')}{E} \quad (3)$$

t : 材齢 t' : 載荷材齢
 $t-t'$: 載荷期間
 $f(\sigma)$: 外力の影響を現す項

自己収縮メカニズムは、水和反応により生じる不安定応力状態を駆動力とすることから、何らかの形でこの不安定度を評価する必要がある。そこで、セメントの鉱物組成である C_3A が自己収縮に対して大きな影響を及ぼす³⁾と考えられていることから、その不安定度を C_3A の水和反応速度に起因すると仮定した。

笠井ら⁴⁾は、図-17に示すように、セメントの各鉱物組成の反応率を材齢の関数として実験的に求めている。そこで本研究では、各材齢に

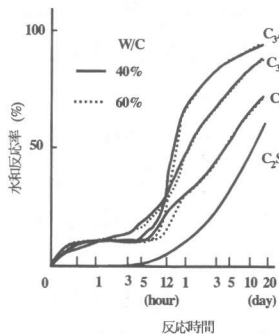


図-17 セメントの各鉱物組成の水和反応率

における C_3A の水和反応率はそれらの実験値を用いることとする。

C_3A の水和進行が材齢28日で停止すると仮定し、材齢28日での水和反応度が100%となるように図-

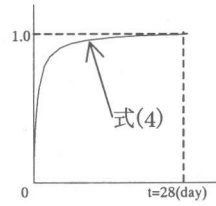


図-18 C_3A の水和反応曲線

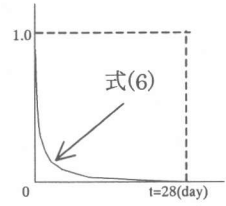


図-19 C_3A の水和進行速度

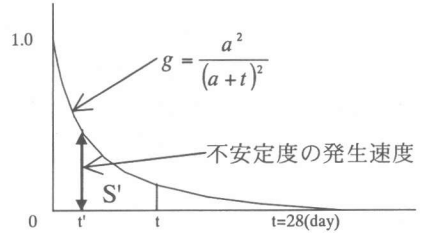


図-20 不安定度発生速度

17中の C_3A の反応曲線を回帰すると、回帰曲線は式(4)のように近似的に表すことができる(図-18)。

$$y = -\frac{a + t_{\max}}{t_{\max}} \left(\frac{a}{a+t} - 1 \right) \quad (4)$$

ここで、式(4)の t_{\max} は水和停止材齢(本研究では $t_{\max} = 28$)、 a は t_{\max} によって決まる定数(本研究では $a = 0.6$)である。そして、式(4)を微分することにより式(5)に示す C_3A の水和反応速度曲線となり、 $t=0$ での水和反応速度が1となるようにすると式(6)が導出される(図-19)。

$$y' = \frac{a(a+t_{\max})}{t_{\max}(a+t)^2} \quad (5)$$

$$g = \frac{a^2}{(a+t)^2} \quad (6)$$

ここで、水和反応がより活発な程、すなわち水和反応速度が大きい程、その時に発生する不安定度が大きくなると仮定し、式(6)を材齢 t における不安定度の発生速度として表すことにする(図-20)。そして、関数 g の $(t-t')$ 間での積分(S')を、関数 g の全区間($t=0 \sim 28$)での積分(S)で無次元化したものが、 $(t-t')$ 間で発生する不安定度(U)とし、式(7)で表す。

$$U = \frac{S'}{S} = \frac{a(a+t_{\max})(t-t')}{t_{\max}(a+t)(a+t')} \quad (7)$$

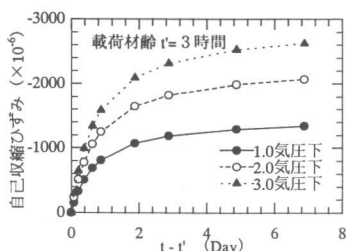


図-21 載荷材齢 $t'=3h$

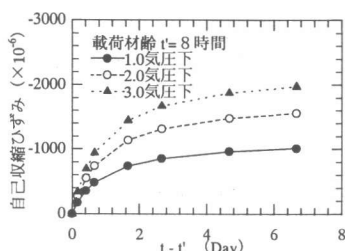


図-22 載荷材齢 $t'=8h$

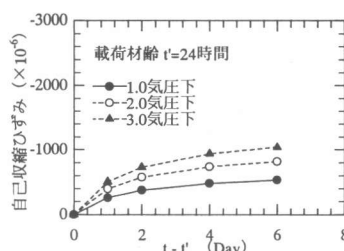


図-23 載荷材齢 $t'=24h$

次に、外力による影響評価は、外力とクリープ変形との間に重ね合わせ則が成立しないことより、図-14~16 に示す一軸状態下での解析値とその時の作用応力との関係から導出した外力作用項(f)を式(8)に示す。

$$f = \left\{ \sqrt{1.7} \left(\sqrt{\frac{p+\sigma}{p}} - 1 \right) + 1 \right\} \quad (8)$$

ここで σ は作用応力、 p は基準圧力(1.0気圧下では $p=0.1$)である。式(8)においても全作用応力($p+\sigma$)を基準圧力(σ)で割ることにより無次元とする。また、ヤング係数に関する評価も無次元化することにより、 E_7/E_{28} で表す。

以上のことから自己収縮存在下におけるクリープ予測式は式(9)のようになり、式(9)に t, t' および σ を代入することにより、任意の条件下でのクリープ挙動を表す。

$$\varepsilon_{cr} = \frac{C_f \cdot U \cdot f}{E_7 / E_{28}} \quad (9)$$

ここで、 C_f はセメントの種類による係数であり、早強セメントでは $C_f=0.0015$ である。なお、この係数 C_f は凝結始発から無載荷の状態で測定した場合の、材齢28日における自己収縮の大きさにほぼ等しい。

そして、本研究が提案する自己収縮存在下におけるクリープ予測式の挙動は、図-21~23に示す通りである。

5. まとめ

本研究では、既存の解析手法の加圧環境下への適応性範囲の拡張として、載荷材齢および雰囲気圧をパラメータとした自己収縮測定値との比較を行った。さらに、外力によるクリープ変

形の重ね合わせ則が成立しないこと、また、自己収縮は水和反応による一種のクリープ変形であることから、自己収縮存在下におけるクリープ予測式を提案した。その結果をまとめる。

(1) 各載荷材齢での自己収縮に及ぼす雰囲気圧の影響は、載荷材齢が若いほどその影響が非常に大きくなることが確認できた。

(2) 既存の解析手法は、各条件下での測定値を精度よく評価しており、加圧環境下に対しての適用性が確認できた。

(3) 水和反応により生じる不安定度を C_{3A} の水和反応に起因して発生するものと仮定し、外力によるクリープと自己収縮を同時に評価可能な自己収縮存在下におけるクリープ予測式を提案した。

参考文献

- 1) 加藤克規, 笠井哲郎, 大下英吉: 水和反応によるクリープ特性としての自己収縮に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.787-792, 1998.
- 2) 浜中 隆, 渡邊智紀, 田中敏嗣, 大下英吉: 自己収縮に及ぼすクリープ特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.739-744, 1999
- 3) 田澤栄一, 宮沢伸吾, 佐藤 剛: 自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響, セメントコンクリート論文集, No.47, pp.528-533, 1993
- 4) 笠井哲郎, 田澤栄一: 硬化収縮の測定によるセメントの水和度の簡易推定法, 広島大学工学部研究報告, Vol.37, No.1, pp.23-29, 1988.